

УДК 532.13

Шингарев Г.Л., Черненко О.С., Іванов М.О. Сидоров О.Є.
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

Температурна залежність в'язкості водно-мазутних емульсій

В роботі досліджуються експериментальні залежності кінематичної в'язкості водно-мазутних емульсій від температури. Водно-мазутні емульсії з великим вмістом води (до 60%) готувалися шляхом тривалого механічного перемішування в циліндричній посудині за допомогою гвинта з металевими щітками. Для визначення в'язкості використовувався метод Стокса. Емульсії є непрозорими рідинами. Тому визначався час руху кульки між верхнім та нижнім шаром рідини. При цьому під емульсію в трубіці знаходився шар води. Рухомим тілом була металева кулька. Для вимірювання в'язкості при різних температурах систему поміщували в більшу колбу, через яку прокачували нагріту воду.

В результаті експериментально показано, що в'язкість мазуту нижча за в'язкість його водних емульсій (при одних і тих же температурах). З підвищенням вмісту води в емульсії її в'язкість збільшується. Для дотримання умови оптимального розпилю ВМЕ (як і інших подібних палив), їх необхідно підігрівати до температур, значення яких вище рекомендованих для чистого (не емульгованого) мазуту.

Ключові слова: емульсія, в'язкість, температура.

Умовні позначення і скорочення:

ВМЕ – водно-мазутна емульсія;

В70м30 – ВМЕ, що складається з 70% води і 30% мазуту;

В60м40 – ВМЕ, що складається з 60% води і 40% мазуту.

Вступ. В'язкість є основною характеристикою, що визначає реологію рідкого палива. Від в'язкості залежить текучість рідини, ефективність розпилювання палива форсунками пальників, витрати енергії на переміщення горючих рідин насосами (тобто їх продуктивність), швидкості осадження механічних домішок пального і розшарування водно-паливних емульсій.

Як показала багаторічна практика теплотехніки [1-2], для забезпечення якісного диспергування рідкого палива пальниками котлів або дизелів в'язкість палива перед форсунками повинна мати значення від 13 до 25 сСт. Верхня допустима межа в'язкості складає 29 – 37 сСт. В процесі підготовки палива необхідне значення в'язкості забезпечується його підігрівом. Для визначення температурного діапазону, що відповідає оптимальній в'язкості палива, використовуються номограми залежності в'язкості палив від температури [3-4]. Для рекомендованого діапазону в'язкості $\nu = 13 - 25$ сСт при підготовці палива для диспергування форсункою мазуту мазкі М100, необхідно підігрівати цей мазут до температур, що лежать в діапазоні від 117 до 144 °С.

Слід зазначити, що в паливній магістралі, що підводить до форсунки, при підвищенні температури палива зростає тиск. Зі зростанням тиску, у зв'язку з фізичною деформацією молекул палива, хімічними реакціями конденсації і полімеризації вуглеводнів відбувається збільшення в'язкості мазуту [5].

Необхідно відзначити, що емульсійна вода впливає на величину в'язкості. Так в [6] приведена теоретична залежність по формулі Річардсона-Джоші [7] кінематичної в'язкості водомасляної емульсії ν від об'ємного змісту C в ній води (при $C = 0$ до 70 %).

$$\nu = \nu_0 \cdot e^{kC}. \quad (1)$$

де ν_0 – в'язкість при нульовій концентрації води; k – емпірична константа. Зазвичай $k < 5$.

В роботі [6] приведені експериментальні залежності кінематичної в'язкості водомасляних емульсій від температури. В'язкість емульсії більше в'язкості будь-якої з компонентів самої емульсії (води чи палива) заміряних при одній і тій же температурі; при підвищенні температури емульсії її в'язкість зменшується.

У діапазоні температур 85 – 95 °С значення в'язкості водомасляної емульсії зі змістом води до 40% від температури порівнюються з в'язкістю мазуту при тій же температурі.

Для водно-мазутних емульсій (ВМЕ) з великим вмістом води дані по залежності їх в'язкості від температури $\nu = \nu(t)$ відсутні. Крім того, зіставлення експериментальних даних з різних джерел показує на значний розкид значень зміряних коефіцієнтів в'язкості однотипних емульсій. Це, на наш погляд, пов'язано з якістю приготованих емульсій різними методами – розподілом глобул дисперсного середовища по розмірах, що визначає характеристики реологій емульсій.

Мета даної роботи стало визначення значення кінематичної в'язкості ВМЕ з великим вмістом води при різних температурах для забезпечення оптимальних варіантів розпилювання цих палив промисловими пальниками.

У теплотехніці, в основному, використовують величини динамічної, кінематичної в'язкості і в умовних одиницях (°Е або °ВУ). Умовна в'язкість – поза-системна одиниця. Величина, що побічно характеризує опір рідині течії. Вимірюється часом закінчення заданого об'єму палива через вертикальну трубку заданого діаметру. Визначається відношенням часу витікання в секундах 200 см³ випробовуваної рідини при даній температурі зі спеціального віскозиметра, до часу витікання 200 см³ дистильованої води з того ж приладу при 20 °С. Вимірюють в градусах Енглера (°Е) або в градусах °ВУ («В'язкість Умовна»).

Опис дослідів з ВМЕ. Для зміни в'язкості водо-мазутних емульсій при різних температурах було прийнято рішення застосувати метод Стокса, так як на момент проведення дослідів були відсутні спеціалізовані віскозиметри типу ВПР-1, ВПРТ-1, ВНР, ВНРТ (Канон-Фенске-Опака), а також найбільш розповсюджені віскозиметри Пінкевича (марки ВПРТ-2 та ВПРТ-4), необхідні для таких експериментів у відповідності до ДСТУ 33768-2015 «Метод визначення кінематичної в'язкості та розрахунок динамічної в'язкості прозорих та непрозорих рідин» [8].

Суть методу Стоксу (методу «падаючої кульки») полягає в наступному. Якщо в посудину з досліджуваною рідиною (рис. 1) вкинути кульку густиною

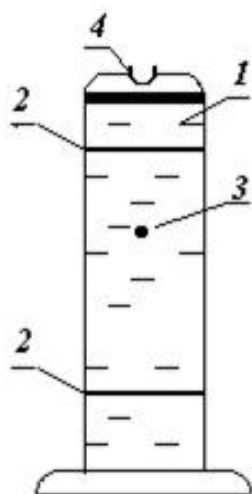


Рис. 1. Схема методу «падаючої кульки» 1 – дослідна рідина (паливо); 2 – верхня та нижня мітки "непрозорої" емульсії; 3 – кулька; 4 – місто вкидання кульки в посудину

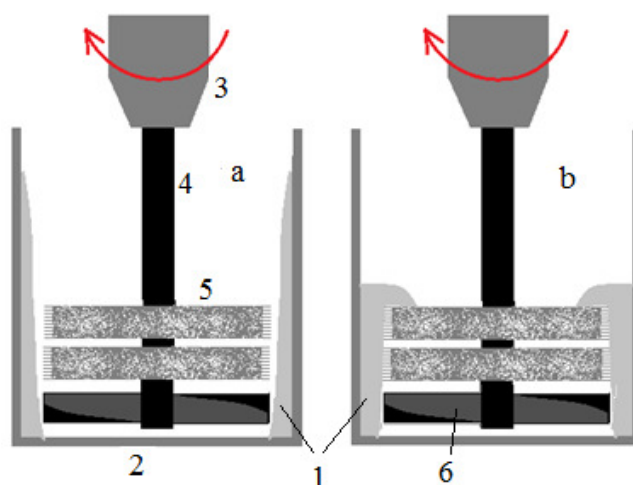


Рис. 2. Схематичне зображення змішувача для приготування емульсій: 1 – емульсія, 2 – ємність для емульгування, 3 – обойма дреля, 4 – металевий вал, 5 – металеві щітки, 6 – пластикові лопаті.

ρ_k більшою за густину рідини ρ_p , то він падатиме з певною швидкістю починаючи з деякої глибини занурення. Для знаходження швидкості седиментації u визначають час t проходження кульки між двома мітками, відстань між якими L . Якщо вважати, що стінки судини, що має внутрішній діаметр D , знаходяться на значній відстані від рухомої кульки (діаметр якого d), то динамічну в'язкість μ досліджуваної рідини методом «падаючої кульки» можна визначити по формулі:

$$\mu = \frac{g \cdot t \cdot d^2 (\rho_k - \rho_p)}{18 \cdot L \cdot \left(1 + 2.4 \frac{d}{D}\right)} \quad (2)$$

Основою стенду є три скляні циліндрові судини діаметру 60 мм і ємністю 1,3 літра кожен на базі стандартних хімічних мірних посудин на 1 л. (рис.2). Всередині кожного з них встановлюється співвісна скляна тонкостінна циліндрова трубка, внутрішній діаметр D якої рівний 23 мм, а довжина $L = 470$ мм. Ця трубка є вимірювальною кюветою, в яку наливається досліджувана ВМЕ. Внизу кювета закрита гумовою пробкою, на яку вона опирається в центральній частині дна зовнішньої посудини. Верхня частина кювети центрується в горлі мірної судини розрізною пористою трубкою. Всі три судини розташовано на платформі, що має три гвинтові шпильки для вертикалізації вимірювальних кювет.

В експериментальний стенд також входять водяний термостат УТ-15, електронний вимірювач температури з хромель-алюмелевою термопарою, ртутний термометр (діапазон 0 – 100 °С з ціною поділки 1 °С), електронні ваги (з ціною поділки 0.01 г, з межею 300 г), мікрометр МТ-3041 (з ціною поділки 0.01 мм), мірні пластикові стаканчики (на 50 мл вагою близько 4 г), скляні посудини на 0.5 л з металевими різьбовими пробками, допоміжний хімпосуд. Час падіння

кульки визначався за допомогою відеокамери в режимі кінозйомки з частотою 30 кадрів в секунду.

Методика проведення дослідів. Установка для приготування емульсії була механічним міксером (рис. 2). Для обертання мішалки використовувався дріль зі змінними регульованими оборотами, в цангову обойму якої вставляється вал металевої щітки. В нижній частині валу прикріплені співвісні лопаті, що встановлені похило до горизонтальної площини. Їх роль – створення додаткових струмів рідини для активації перемішування. Компоненти майбутньої емульсії в заданих пропорціях заливаються в металеву циліндричну ємність, дно якої контактує з електроплитою. Нагрівалася суміш до 90 °С, що активує процес емульгування.

Помічено, що коли емульсійна рідина на певному етапі приготування суміші починає опускатися зі стінок на верхню щітку (рис. 2b), то починався етап гомогенізації емульсії. Це непрямим чином вказувало про початкову фазу готовності емульсії (візуально вона виглядала однорідною). Орієнтовний час – 40 хвилин для 300 мл вихідної суміші.

Оскільки водно-мазутні емульсії є непрозорими рідинами, то класичний варіант «падаючої кульки» з визначенням часу проходження два міток (рис. 1) був в даних експериментах модернізований наступним чином. Верхньою міткою, де починається відлік часу руху кульки в рідині, є верхній зріз циліндрової кювети, в яку рідину налита «по край». Кульку не кидають в кювету, а як би «кладуть» на поверхню рідини в центрі кювети.

Нижня мітка є межею між водою, що знаходиться в придонній частині кювети і нижньою частиною непрозорого стовпа рідини (ВТЕ). Для створення такої мітки спочатку в чисту кювету наливають стільки води, щоб її рівень від дна кювети (району пробки) був близько 30 мм. Потім в кювету акуратно наливають підігріту емульсію так, щоб вона стікала по стінках. Тим самим утворюється рівна межа внизу кювети «Вода-емульсія». Відстань між такими «мітками» вимірювалася лінійкою з точністю ± 0.5 мм. Геометричні параметри вимірювальних кювет: внутрішній діаметр всіх кювет $D = 23$ мм, відстань L між мітками 450 мм.

У дослідах використовувалися сталеві кульки з підшипника, очищені від старого масла розчинником Р646. Вимірювання їх діаметрів проводилися мікрометром МТ-3041. Діаметр всіх кульок d складав 6 мм. Для того, щоб переконатися, що вони виконані з підшипникової сталі ШХ-15, їх густина визначалася ваговим методом. Маса кожної кульки складала 0.88 г. Звідси густина $\rho_k \approx 7810$ кг/м³.

Вимірювання температурної залежності кінематичної в'язкості емульсій проводилися по наступному алгоритму. Емульсії, а також мазут наливалися в півлітрові скляні ємності і закупорювалися різьбовими пробками. Ємності повністю занурювалися в термостат, вода в якому нагрівалася (при перемішуванні насосом термостата) до 90 °С. Вимірювання температури води в термостаті проводилося ртутним термометром з ціною поділки 1 °С. Досягши температури води 90 °С, ємності витягувалися з термостата, а емульсії з цих ємностей пере-

Табл. 1. Вимірні густини мазуту та ВМЕ

Вид палива	Температура, °С	Густина ρ_p , кг/м ³
Мазут	70	954,8
B50M50	78	949,4
B60M40	75	936,0
B70M30	76	932,6

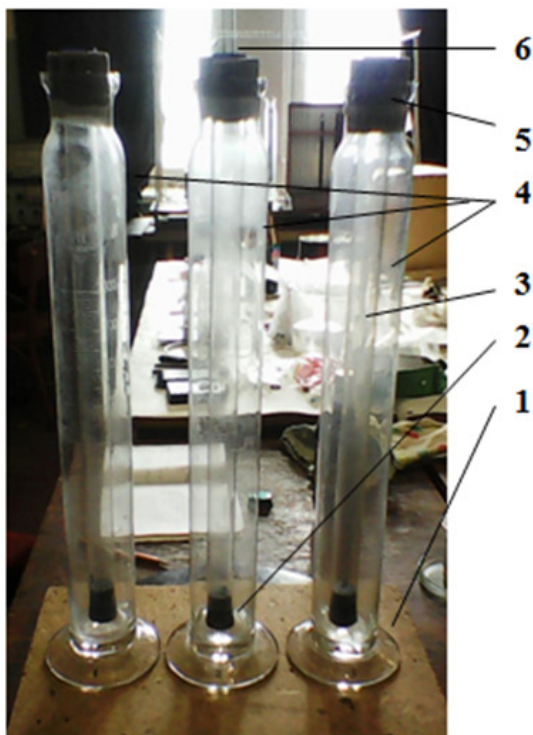


Рис. 3. Ємності вимірювального стенду: 1) Платформа для вертикалізації вимірювальних кювет; 2) пробка для нижньої частини кювети; 3) вимірювальна кювета; 4) зовнішня скляна ємність для термостатування кювети ; 5) розрізна порувата трубка для центрування кювети; 6) центр вимірювальної кювети, куди вноситься кулька.

ливалися у вимірювальні кювети (рис. 3). Нагріта вода з термостата заливалася в мірні посудини до їх максимального заповнення. Тим самим створювався режим термостатування емульсії у вимірювальній кюветі.

Залишок емульсій в скляних ємкостях йшли на визначення їх густин ρ_p при температурі, близькій до 80 °С. Густина визначалася зважуванням на електронних вагах в мірному пластиковому стакані 50 мл (табл. 1).

Температури емульсій, що знаходяться в термостатованих кюветах, визначалися електронним датчиком, хромель-алюмелева термопара якого вводилася в кожен кювету на глибину, приблизно рівній половині відстані між мітками (близько 220 мм). По мірі охолодження емульсій від 80 до 40 °С (швидкість охолодження була приблизно 10 °С за 20 хвилин) з кроком 10 °С визначалася в'язкість ВМЕ, а також чистого мазуту. Для кожної температури для кожної емульсії використовувалися 3 кульки.

В ході експериментів було відмічено налипання емульсії на кульки при виході їх з емульсивного стовпа в кюветі в область водяного стовпа (проходженні нижньої межі)(рис.4). Це налипання мало місце навіть тоді, коли кульки були спеціально покриті тонким шаром вакуумного масла. По мірі охолодження паливних рідин (збільшення їх в'язкості) ступінь налипання збільшувався.

На рис. 4 показано три фотографії процесу виходу кульки з емульсивного стовпа в область водяного стовпа. На фрагментах кінозйомки *б)* і *в)* видно, як за



а) початок виходу кульки б) через 1/30 секунди в) через 2/30 сек. після виходу

Рис. 4. Фотографії процесу виходу сталеві кульки зі стовпа емульсії.

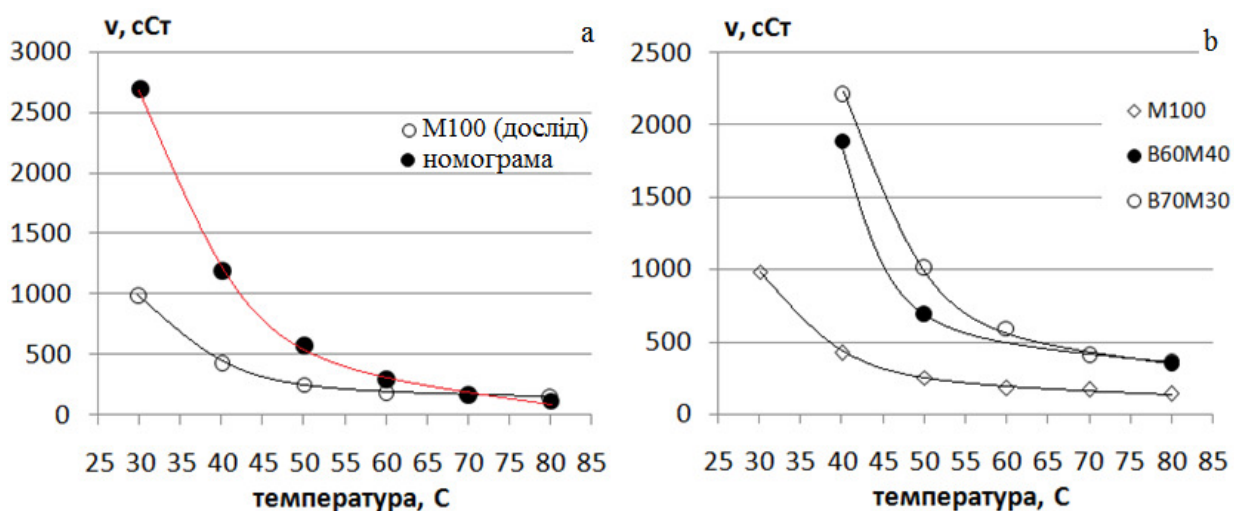


Рис. 5. Дослідні дані по вимірювання температурних залежностей в'язкості $\nu = \nu(t)$ мазуту M100 та його емульсій:

- а) порівняння $\nu = \nu(t)$ мазуту з номограмою;
- б) порівняння дослідних кривих $\nu = \nu(t)$ для мазуту та емульсій B60M40 і B70M30

кулькою з налиплою емульсією тягнеться «стовп» емульсії, який потім втягується назад у вимірювальну кювету при досягненні кулькою її дна.

Результати обробки даних і їх інтерпретація. В досліді визначалися в'язкість двох емульсій B60M40, B70M30 і мазуту. Саме такі емульсії цікаві насамперед можливістю їх стійкого горіння при електрокінетичній дії на них в процесі розпилювання.

Результати вимірювань в'язкості мазуту і емульсій від температури представлені на рис. 4. Дослідні дані в області температур 60°C і нижче розходяться з рекомендованими довідковими джерелами. Причому тим більше, чим нижче температура палив. Наприклад, якщо в області 70 – 80 °C має місце добрий збіг дослідного і табличного значень (в рамках помилки експерименту), то вже при 60 °C значення в'язкості мазуту відрізняється від номограмної на величину в 300 сСт. При 40 °C дана різниця відрізняється вже в 3 рази. Це говорить про те, що метод «падаючої кульки» для високої в'язкості палива не прийнятний вна-

слідок того, що рідини по властивостях реологій перестають описуватися формулою Стоксу, і, як наслідок, експериментальна методика визначення в'язкості на цьому принципі (методі «падаючої кульки») перестає бути коректною. Проте, добрий збіг дослідних і табличних даних для мазуту М100 при температурах, більших за 60 °С дає підставу зробити наступні висновки для ВМЕ:

- експериментально показано, що в'язкість мазуту нижча за в'язкість його водних емульсій (при одних і тих же температурах);
- с підвищенням вмісту води в емульсії її в'язкість збільшується;
- для дотримання умови оптимального розпилу ВМЕ (як і інших подібних палив), їх необхідно підігрівати до температур, значення яких вище рекомендованих для чистого (не емульгованого) мазуту.

Так, по номограмі [2-4] діапазон температур підігріву мазуту М100 лежить від 117 до 144 °С. Для ВМЕ зі значним змістом води (більшим за 60% від загальної маси емульсії) цей діапазон зміщується в область ще більших температур, де водяні глобули емульсії схильні до процесу активного кипіння. Така «перегріта» емульсія знаходиться в нерівноважному стані, причому її поведінка при диспергуванні форсункою достовірно не описана в науковій літературі. Це є підставою для подальшого комплексного дослідження даної проблеми аналітичним і експериментальним шляхом.

Висновки. Багаторічна практика теплоенергетики рекомендує для якісного диспергування рідкого палива пальниками котлів забезпечити в'язкість палива перед форсунками в діапазоні значень від 13 сСт до 25 сСт. Для важких вуглеводнів такі вимоги досягаються підігрівом палива до певних температур, розрахунок яких проводиться по спеціальних номограмах. Останнім часом застосування плазмових методів активації і стимуляції процесів горіння воднопаливних емульсій з високим вмістом в них води, також передбачає попередній нагрів палива перед подачею його у форсунку пальника.

Огляд літературних джерел і власні експериментальні дослідження показали, що температура підігріву водно-паливної емульсії повинна бути вище за температуру нагріву пального, що є основою емульсії. Забезпечення такого теплового режиму може переводити емульсивне середовище в нерівноважний «перегрітий» стан, вивчення якого дасть можливість підвищити ефективність процесу диспергування палива. В'язкість емульсій з вмістом води в 60-70% збільшується по мірі збільшення вмісту води (відносно мазуту в 2 і більше разів), а густина – зменшується.

Література:

1. Демидова Н.П., Марченко А.А., Онищенко О.А. Основные показатели судового топлива и их основные эксплуатационные свойства // Вестник КамчатГТУ. – 2015. – № 32. – С. 6-11.
2. Удосконалення системи паливопідготовки суднових середньообертових дизелів шляхом зниження концентрації компонентів, що містять сірку : дис. ... канд. тех. наук / Солодовников В.Г.; Одес. нац. мор. акад. – О., 2015. - 201 с.

3. Нефтепродукты (справочник) / ред. *Е.С. Левина* и др.. – М.: Химия, 1966. – 776с.
4. *Исламов М.Ш.* Печи химической промышленности, – Химия, 1975. – 434 с.
5. *Адамов В.А.* Сжигание мазута в топках котлов. – Л.: Недра, 1989. – 304 с.: ил.
6. Особенности испарения и горения капель водо-топливных эмульсий тяжелых углеводородов : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.17 / *Опятюк В.В.*; Одес. нац. ун-т им. И. И. Мечникова. – О., 2012. - 139 с
7. *Клейтон В.* Эмульсии их теории и техническое применение. – М., Химия, 1950. – 137 с.
8. ГОСТ 33768-2015 «Метод определения кинематической вязкости и расчёт динамической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей» <http://docs.cntd.ru/document/1200141744>

Shyngarev G.L., Chernenko A.S., Ivanov M.A., Sydorov A.E.

Temperature dependence of the viscosity of water-fuel oil emulsions

SUMMARY

The experimental dependence of the kinematic viscosity of oil-water emulsions on temperature was examined. Oil-water emulsions with a high water content (up to 60%) were prepared by long-term mechanical stirring in a cylindrical vessel using a screw with metal brushes. The Stokes method was used to determine the viscosity. Emulsions are opaque liquids. Therefore, the movement metal ball's time between the upper and lower layers of liquid was determined. At the same time, there was a layer of water under the emulsion in the tube. To measure the viscosity at different temperatures, the system was placed in a larger flask through which heated water was pumped.

As a result, it was experimentally shown that the fuel oil viscosity is lower than oil-water emulsions viscosity (at the same temperatures). As the water content in the emulsion increases, its viscosity increases. In order to meet the conditions of optimal spray of WOE (as well as other similar fuels), they must be heated to temperatures higher than those recommended for pure (non-emulsified) fuel oil.

Key words: emulsion, viscosity, temperature